

INVESTIGACIÓN DE CAUSAS DE EXPLOSIONES EN PLANTAS PETROLÍFERAS: EL ACCIDENTE DE BUNCEFIELD ¹

Jean Batista Abreu² y Luis A. Godoy³

Resumen. Se estudia el accidente ocurrido en un gran depósito de combustible en el Reino Unido, al norte de Londres, a finales del 2005, con el fin de identificar el proceso de formulación de hipótesis que se llevaron a cabo para explicarlo. La importancia de este accidente está asociada a la gran magnitud del daño ocasionado, que excedió en mucho el valor de las estructuras destruidas. Por otra parte, el incendio producido fue de tal magnitud que destruyó la mayor parte de las evidencias que habrían permitido identificar fácilmente las causas. El trabajo describe al depósito de Buncefield y sus tres niveles de contención; a continuación se describe el incidente ocurrido en 2005 y la evolución de las hipótesis formuladas para identificación de las causas. Finalmente, se describen las consecuencias ambientales y legales del incidente, y las lecciones aprendidas del estudio.

Palabras clave: accidente, causas del accidente, combustible, incendio, tanques.

INVESTIGATION OF THE CAUSES OF EXPLOSIONS IN OIL PLANTS: THE BUNCEFIELD INCIDENT

Abstract. This paper reports on an accident occurred in a large fuel deposit located north of London in the United Kingdom. The purpose of the study is to identify the process of hypothesis formulation which took place in order to explain the causes of the incident. The importance of this incident is related to the magnitude of the damage produced, which exceeded by far the cost of reposition of the facilities. Further, the fire produced was of such a magnitude that destroyed most evidences that would have facilitated the identification of causes. The article describes the Buncefield deposit and its three levels of containment, followed by a description of the incident that occurred in 2005, and the evolution of the hypotheses formulated to identify causes. Finally, the environmental and legal consequences of the accident are described, and lessons learned from the study are identified.

Keywords: accident, accident causes, fire, fuel, tanks.

INTRODUCCIÓN

Petroski (1994) ha enfatizado la importancia de estudiar fallas estructurales en ingeniería, apoyándose en la idea de que se puede aprender mucho de experiencias que hayan ocurrido. La idea subyacente es que las fallas asociadas a errores en el diseño se han repetido a través de la historia de la ingeniería, de modo que el aprendizaje acerca de lo ocurrido en el pasado puede llegar a disminuir el riesgo de construcciones en el futuro. Un argumento similar fue propuesto años antes por Sibly y Walker (1977), quienes investigaron fallas en puentes para entender los patrones de ocurrencia. El estatus de teorías orientadas a identificar causas de fallas estructurales fue revisado por Godoy et al. (2001).

Recientemente, Delatte (2009) ha integrado lecciones aprendidas en fallas ingenieriles, alentando la enseñanza de ingeniería forense y estudios de casos de falla en la Ingeniería Civil. Una de las dificultades citadas por Delatte para promover ese tipo de educación es la falta de estudio de casos sobre los que se pueda basar la enseñanza.

¹ Artículo recibido el 1 agosto 2009 y aceptado el 16 agosto de 2009.

² Estudiante graduado, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, Puerto Rico 00680-9000, E-mail: jbatisa_nig@hotmail.com

³ Catedrático, Director del Centro de Investigaciones en Infraestructura Civil, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, Puerto Rico 00680-9000, E-mail: luis.godoy@upr.edu

Desde la última década, un grupo de investigadores de la Universidad de Puerto Rico se ha dedicado a investigar las causas de falla de tanques de almacenamiento de petróleo, considerando fallas debidas a vientos huracanados, a terremotos, a vacío interior y a descenso de parte de la base. Debido a que se trata de estructuras de pared muy delgada, en las etapas de falla estas estructuras presentan deformaciones importantes e inestabilidad.

Adicionalmente, hay casos en los cuales las fallas se producen por otro tipo de causas, incluyendo fallas de tipo funcional, pero que de todas formas conducen a consecuencias catastróficas. En el apéndice se ilustran algunos casos de incendios producidos en granjas de tanques en los años recientes, y en varios casos se detecta que el inicio del incendio se produjo asociado a vapores que surgen de los combustibles. En este artículo se considera el desastre conocido como “incidente de Buncefield”, que ocurrió en Gran Bretaña en 2005.

Hay varias razones por las que interesa reconstruir el estudio del desastre de Buncefield. En primer lugar, porque involucró un incendio de gran magnitud en una granja de tanques en uno de los mayores accidentes que han ocurrido. En este sentido es comparable a un accidente ocurrido en la isla de Guam en el 2002, que también destruyó una planta entera por incendio; la causa en Guam fue un techo flotante que se trabó. La falla de tanques en ambos casos, condujo a mucho más que la pérdida de la estructura involucrada, propagándose las consecuencias en una reacción en cadena.

En segundo lugar, nos interesa este incidente porque una indagación en la documentación existente sobre el caso (Buncefield Major Incident Investigation Board, 2006a; 2006b; 2006c; 2008a; 2008b) permite estudiar en detalle la construcción de las hipótesis realizadas por los investigadores, en distintos niveles de causalidad. Este es un ejemplo en el cual el desastre es de tal magnitud que destruyó la mayor parte de las evidencias que habrían permitido identificar totalmente sus causas. En colapsos de estructuras en los que se tienen sus restos más o menos inalterados, es posible reconstruir la forma en que colapsaron, postulándose mecanismos de falla consistentes con la evidencia que ha quedado. En este caso de Buncefield ni siquiera se conocía inicialmente cuál era la primera de las estructuras que falló.

EL DEPÓSITO DE BUNCEFIELD

La terminal de almacenamiento de combustible conocida como “depósito de Buncefield” se encuentra en Hemel Hempstead, en el condado de Hertfordshire, Inglaterra, localizado al norte de Londres.

El depósito de Buncefield ocupaba el lugar número 50 en orden de capacidad de los almacenamientos de combustible británicos y era operado por Total SA y Texaco, las cuales funcionan en alianza bajo el nombre de Hertfordshire Oil Storage Ltd (HOSL). British Petroleum (BP) también manejaba reservas de combustible e instalaciones en el lugar. El sitio fue operado por la British Petroleum Agency (BPA).



Figura 1: Vista aérea del depósito de Buncefield antes del incidente. (Buncefield Major Incident Investigation Board, 2008b).

El depósito fue creado para contener y manejar combustibles como queroseno, combustible de aviación, diesel y otros derivados del petróleo. Estaba en funcionamiento activo desde 1968 y constituía el 8% de la provisión del país en el 2005.

La planta ocupa un área de unos 200,000 m² y tiene un perímetro de más de 2,500 m. Está ubicada sobre una capa de arcilla de baja permeabilidad de 2 m a 10 m que protege un acuífero inferior usado para suplir agua a la región. En los alrededores había varios edificios de negocios y residencias, como se ilustra en la Figura 1.

Las vías de transporte terrestre dividen el área en la zona norte correspondiente a HOSL y BPA y la zona sur que pertenece a BP.

En la zona de HOSL oeste había 19 tanques activos, un establecimiento de oficinas administrativas, una cabina de control de funcionamiento, una zona de carga destinada al llenado de camiones cisterna (habilitada para nueve camiones) y una laguna junto a una caseta de bombeo para casos de emergencia.

La zona este de HOSL contenía un total de siete tanques, edificio de oficinas administrativas y una playa de estacionamiento con capacidad para unos 80 vehículos.

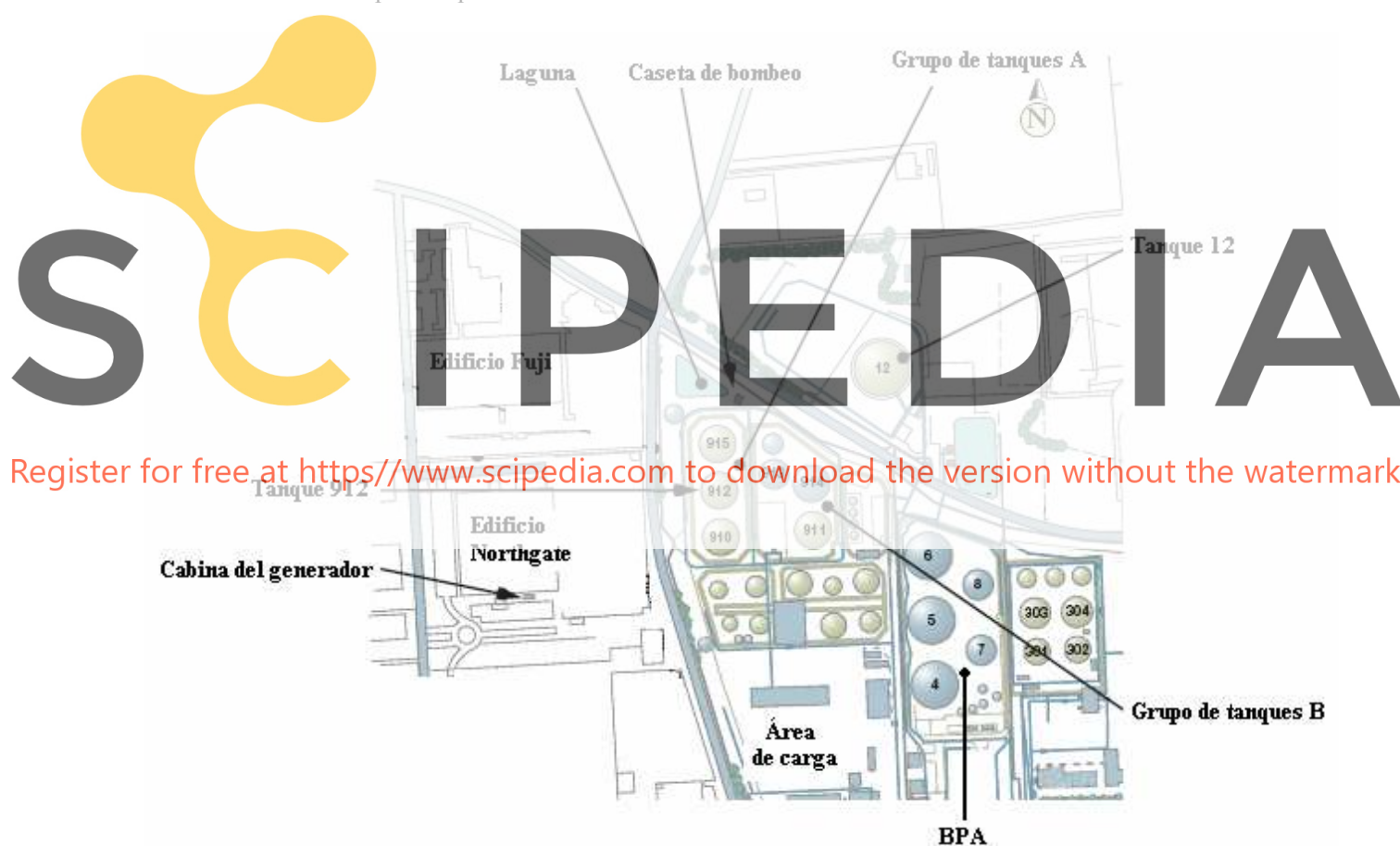


Figura 2: Área norte del depósito de Buncefield indicando los tanques de almacenamiento.

Tres sistemas de tuberías principales conducían el combustible hacia el depósito: “FinaLine” y “Mersey-Buncefield”, de 10 pulgadas de diámetro cada una y “Thames-Buncefield”, de 14 pulgadas de diámetro, llegando desde Lindsey, Humberside y Shell Haven, respectivamente. Dentro del depósito, las tuberías se ramificaban con el fin de suplir de combustible a varios tanques.

La capacidad de almacenamiento total de la terminal de Hertfordshire era de 194 mil toneladas de combustible. Los productos recibidos eran clasificados y almacenados en los 41 tanques metálicos de forma cilíndrica y luego distribuidos a través de camiones-cisterna o por vía de tuberías de diámetros de 6 a 8 pulgadas las 24 horas del día. En promedio, se

llenaban a diario 400 camiones cisterna y también se le suplía combustible a los aeropuertos de Luton, Heathrow y Gatwick.

La planta mantenía tres niveles de contención para garantizar la seguridad en el manejo y almacenamiento de los productos en el caso de que hubiese alguna pérdida de combustible en el sistema. Los niveles de contención estaban diseñados para funcionar de forma íntegra y sucesiva, es decir, en caso de falla del nivel 1, el nivel 2 debía activarse y ejercer la función de contención. Asimismo, en caso de insuficiencia o discapacidad de contención eventual del nivel 2, el nivel 3 debía manejar el líquido derramado de forma predeterminada.

El nivel de contención primario estaba constituido por los elementos del sistema que tienen contacto directo con los productos combustibles manejados. En general, forman parte del nivel de contención primario las tuberías, los camiones cisterna y los tanques.

Los diámetros de los diferentes tanques variaban entre 5m y 45m y sus alturas variaban entre unos 10m a 30m. Los tanques contenían en su interior techos flotantes con cierre hermético y flexible suspendidos sobre el combustible para evitar la formación de vapores. Como describe Myers (1997), ésta es la forma más común de diseño de tanques de almacenamiento de combustible. Además contaban con un conjunto de sensores de temperatura y niveles de llenado para mantener el control, teniendo varios ventiladores de sección triangular o circular para permitir flujo de aire en el techo (véase la Figuras 3).

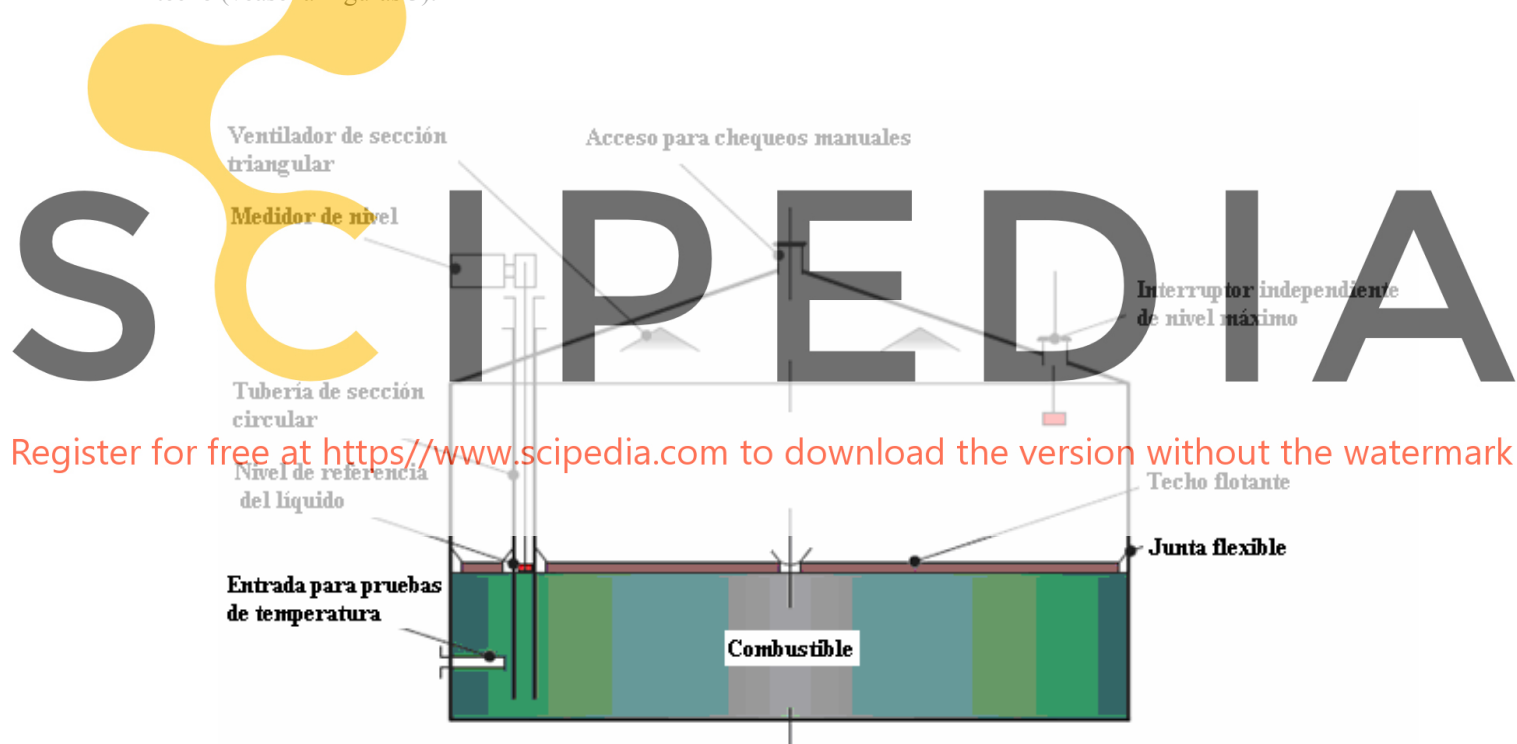


Figura 3: Esquema general de los elementos que componían los tanques de Buncefield (Buncefield Major Incident Investigation Board, 2006c).

El perímetro del techo de los tanques estaba bordeado por placas desviadoras para capturar y conducir el agua que pueda caer sobre la cubierta. Las paredes del tanque poseían en el exterior elementos rigidizadores en forma de aros para proveer estabilidad en la dirección radial y ayudan a mantener la forma cilíndrica frente a presiones normales a la cáscara.

El nivel de contención secundario estaba constituido básicamente por diques de contención formados por parapetos de concreto o suelo que circundaban a grupos de tanques, de modo que un escape de líquido desde los contenedores primarios quedara atrapado. La capacidad de almacenamiento de un dique que bordea a un grupo de tanques se diseña de modo que pueda capturar no menos de un 110% del volumen del mayor tanque encerrado.

Los elementos de seguridad también forman parte del nivel secundario. El sistema de seguridad previene la posible falla del nivel primario y consta principalmente de un conjunto de sensores automáticos, medidores de temperatura, alarmas visual y audible en caso de anomalías en el funcionamiento y desempeño de los tanques e interruptores para el cerrado de las válvulas que controlan el paso de fluidos por los ductos. Los equipos electrónicos en la cabina de control recibían información continua de los indicadores de temperatura y nivel de combustible situados en los tanques. Una vez alcanzado cierto nivel máximo en el tanque, las alarmas se activaban dando aviso a la cabina de control. Junto con las alarmas, se iniciaría el cierre automático de las válvulas de los oleoductos. Existía un circuito cerrado de televisión para captar, grabar y transmitir imágenes, que servía de medio de vigilancia y monitoreo del área.

El nivel de contención terciario se daba por medio del sistema de drenaje del área y de las barreras perimetrales, en forma tal que los líquidos fluyan en dirección predeterminada y queden atrapados dentro del depósito sin llegar al exterior ni ser absorbidos por el suelo, con lo cual se intentaba evitar la contaminación de aguas subterráneas y regiones aledañas.

INCIDENTE DE DICIEMBRE DE 2005

En la mañana del domingo 11 de diciembre de 2005 ocurrieron múltiples explosiones en el depósito de combustible de Buncefield. Eran alrededor de las 6:00am cuando se escuchó el estruendo del evento principal, reportándose un movimiento de magnitud 2.4 en la escala de Richter.

Columnas gigantescas de humo negro se esparcieron en toda la zona alcanzando unos 3 kilómetros de altura, mientras que las llamas de fuego crecían sin control elevándose unos 60 m (véase la Figura 4). El área cubierta por las llamas de fuego y la columna de humo corresponde a la zona oeste de HOSL. Se observa que los tanques de BPA, BP y HOSL este no se vieron afectados al momento de la fotografía. Veinte tanques de almacenamiento de combustible contribuyeron con el incendio; el total de combustible contenido en dichos tanques era aproximadamente 225,000 m³.

Las nubes oscuras fueron reportadas por imágenes vía satélite cubriendo 80 mil metros cuadrados momentos después de la explosión. Testigos de Francia, Bélgica y los Países Bajos, a más de 160 kilómetros, afirmaron haber escuchado un sonido similar al producido por un sismo o una explosión. Múltiples explosiones secundarias de menor magnitud sucedieron minutos después.



Figura 4: Depósito de Buncefield durante el incendio. (Buncefield Major Incident Investigation Board, 2008b).

En edificaciones cercanas al depósito se desprendieron puertas de sus marcos y se quebraron los cristales de las ventanas hasta unos 8 kilómetros del lugar. Resultaron heridas 43 personas, la mayoría de éstas con lesiones leves debidas a los vidrios y otros objetos que volaban y a dificultades respiratorias por el humo intenso. En los interiores de algunas viviendas se hallaron grietas en paredes y techos.

Brigadas de policías y bomberos arribaron a la zona para enfrentar el siniestro. Alrededor de dos mil personas fueron evacuadas, algunos de ellos traumatizados y bajo condiciones de estrés postraumático. Los habitantes de zonas próximas fueron advertidos de mantenerse en sus casas y hacer uso de las líneas telefónicas de emergencia. Nadie perdió la vida por causa de la catástrofe.

El fuego comenzó a ser apagado por los bomberos un día después mediante el uso de agua y espuma. Las llamas se mantuvieron ardiendo durante varios días, desprendiendo una cantidad de contaminantes equivalentes al 6% de las emisiones anuales que ocurren en todo el Reino Unido.

El incidente fue identificado como el “más grande incendio visto en época de paz en Europa” desde la Segunda Guerra Mundial en 1945. Se consumieron unos 105,000 m³ de derivados de petróleo provenientes de 23 tanques de almacenamiento, dejando más de 200 viviendas dañadas y miles de desempleados como consecuencia de los 630 negocios perjudicados.

INVESTIGACIÓN DEL INCIDENTE

La Agencia de Salud y Seguridad (HSE por sus siglas en inglés) es la autoridad Británica encargada de velar por el cumplimiento de las disposiciones y normas de salud y seguridad en el país. Se compone por tres miembros designados por la Comisión de Seguridad y Salud (HSC) y la Secretaría de Estado que capitanean unos 4 mil empleados especialistas en distintas áreas. La Agencia Ambiental (EA) es el principal organismo regulador de medidas para la protección del ambiente. Ambas conjuntamente son responsables de mantener el equilibrio de actividades industriales no-nucleares que representen un peligro en potencia con base en las Regulaciones para el Control de Riesgos Accidentes Significativos (denominado COMAH por sus siglas en inglés).

HSE y EA fueron las agencias responsables de llevar a cabo la investigación del Incidente de Buncefield. HSC designó un “Equipo de Investigación” denominado Major Incident Investigation Board (MIIB) para que explicase qué pasó realmente, cómo se dieron los hechos y porqué sucedieron. El equipo, conformado por especialistas en inspección e investigación, se reunió por primera vez el martes 24 de enero del 2006 (alrededor de un mes y medio después del incidente). El equipo fue encabezado por el Dr. Peter Baxter, experto en Salud y Seguridad, quien fue designado como el equipo encargado de supervisar la investigación. El químico-geólogo Taf Powell, experto en Manejo de Petróleo y Regulaciones de Seguridad, se encargó de dirigir las investigaciones y preparar los reportes del avance de la misma. Los demás miembros del comité independiente fueron David Ashton (representante de HSE), Dr. Paul Leinster (representante de EA), Dr. Peter Baxter (experto en Salud) y el Profesor Dougal Drysdale (experto en Ingeniería y Seguridad contra Incendio).

HIPÓTESIS INICIALES PUBLICADAS POR LA PRENSA

De acuerdo a los periódicos “The Guardian” y “The Times”, las hipótesis iniciales que se hicieron acerca de las posibles causas del incidente fueron las siguientes:

1- Accidente: La eventualidad fue considerada como posible accidente de manera oficial por parte de la policía británica. A pesar de esto, la Agencia de Salud y Seguridad (HSE) enfatizó en que las medidas de seguridad en el lugar eran adecuadas. Nunca se había reportado ningún incendio grave en la historia del depósito. Si realmente se tratase de un accidente, afirmaban, eso habría señalado la vulnerabilidad de este tipo de centros de almacenamiento en el Reino Unido.

2- Sabotaje: El daño podría haber sido provocado intencionalmente para estropear el desarrollo del estratégico depósito de Buncefield. La terminal de 200,000 m² se mantenía vigilada 24 horas a través de un circuito cerrado de televisión y era de acceso controlado. El perímetro se hallaba cercado; sin embargo, un empleado testificó haber salido del lugar a través de aperturas existentes en el alambrado.

3- Impacto de un avión pequeño: Se rumoraba que una pequeña aeronave se había estrellado contra algún tanque del depósito. Residentes de la zona comentaron haber escuchado el sonido de un avión volando a poca altura,

probablemente en dirección al aeropuerto de Luton. Sin embargo, la policía afirmó días después que ningún avión había causado las explosiones.

4- Funcionamiento inadecuado de los oleoductos: Un residente comentó haberse quejado en varias ocasiones debido al fuerte olor del vapor de petróleo proveniente de alguna posible fuga. Las tuberías estaban diseñadas para resistir impactos pero no eran infalibles. Todos los ductos fueron cerrados justo después de la explosión, siendo reportada por los expertos la poca probabilidad de daño en los mismos debido al fuego.

5- Error humano: El Depósito de Buncefield se encontraba en el nivel 3 de seguridad según la escala del “Sistema Internacional de Medición de Seguridad” en la cual el nivel superior es el nivel 4. No obstante, resultó sospechoso que en lugar de haber nueve operadores en servicio al momento del evento, sólo había dos operadores además de cinco conductores de camiones cisterna y cuatro trabajadores de mantenimiento.

6- Ataque terrorista: Un alto dirigente del grupo Al-Qaeda había difundido en días pasados un video en el que instaba a atacar a las instalaciones de petróleo en los Países Árabes. Los servicios de seguridad no mostraron mucho interés en esta sospecha ya que, según expertos, la forma en que sucedió el evento no encajaba en el perfil terrorista. Surgió la idea de que la casi inmediata respuesta de la policía era una táctica para evitar alarma en la población.

7- Falla en los tanques de almacenamiento: Se presumió que existía la posibilidad de un inadecuado funcionamiento de los tanques contenedores de combustible en Buncefield. Testigos afirmaron haber sentido un fuerte olor en la zona y haber visto vapor saliendo de los tanques alrededor de 10 minutos antes del estallido. Describían una neblina de hasta 5 m de espesor en algunas zonas del depósito.

8- Chispas del motor de un vehículo: Días después del evento, un conductor de camiones cisterna confesó ante las autoridades policiales haber apagado súbitamente su vehículo haciendo que se desprendieran chispas del motor. Las chispas pudieron encender el combustible proveniente de alguna fuga desapercibida posiblemente del mismo camión y provocar las explosiones. El encargado de operaciones por parte de la policía expresó que había varias posibles fuentes de ignición a ser evaluadas.

9- Choque de un objeto volador no identificado: Se difundió el rumor de que algunas personas habían visto objetos similares a bolas de fuego o pequeños meteoritos caer sobre el depósito de Buncefield momentos antes de las explosiones. Ningún objeto extraño en particular fue encontrado por las autoridades.

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

Esta hipótesis se apoyó en las hipótesis de causas 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10. Se consideró que el incendio se desarrolló a partir de un evento que cubrió un espectro variado de causas posibles que irían descartándose al pasar el tiempo. Es interesante constatar cuán amplias eran las posibilidades iniciales que se barajaban durante la primera semana.

En resumen, las causas 3 y 9 se refieren al impacto de un objeto que cae desde el aire y se estrella contra algún elemento del depósito. Las causas 2 y 6 se refieren a actos humanos intencionales que provocan las explosiones. Las causas 1, 5 y 8 aluden a un incidente asociado a falta de seguridad. Las causas 4 y 7 corresponden a fallas en el funcionamiento de componentes del sistema de la terminal de Buncefield.

NIVELES DE HIPÓTESIS PARA IDENTIFICACION DE CAUSAS

Carecemos de la información que manejó el comité en sus primeras etapas, y tampoco sabemos qué argumentos específicos se usaron para descartar hipótesis como las postuladas originalmente en la prensa. Al parecer se habían descartado la hipótesis de impacto desde el aire y también las de actos humanos intencionales, de manera que la investigación se concentró en fallas internas al sistema del depósito de Buncefield.

La hipótesis general que se manejó fue que el fuego podría haberse generado a partir de una pérdida de combustible de algún elemento del depósito.

Entendemos que para identificar las causas del incidente requiere de lo siguiente: (a) Identificar el componente de la planta que falló originalmente. (b) Postular un mecanismo por el cual, a partir de ese componente, podría haberse generado una pérdida de combustible. (c) Postular un mecanismo por el cual, a partir de combustible fuera del circuito primario de contención, podría haberse generado fuego.

A continuación discutiremos cada una de las causas y los eventuales mecanismos.

(a) Identificación del origen del incidente.

La investigación se inició en base a la información recopilada y los datos conocidos en un principio. Un aspecto crucial en la investigación fue identificar cuál fue el origen de la primera falla y explosión, que luego se extendió a las demás partes del depósito. Para ello se usaron observaciones de testigos y filmaciones existentes.

El punto de partida fue que había evidencia de la aparición de cierta neblina descrita por testigos de la zona. Varias personas que circularon en las cercanías del depósito alrededor de 10 minutos antes del inicio de los estallidos coincidieron en haber visto un vapor en ciertas áreas del depósito, en especial en el grupo de tanques identificado como A (véase la Figura 2). Además hicieron alusión a un fuerte olor a gasolina o petróleo.

Adicionalmente, se pudieron usar grabaciones del sistema de circuito cerrado de televisión. Dichas imágenes corroboraron la presencia de un fluido gaseoso registrado por primera vez a las 5:38 de la mañana el día de las explosiones. El gas fue visto en la misma zona identificada por los testigos, fluyendo por encima de los parapetos y esparciéndose según la pendiente del terreno. También fue vista la neblina en el área del grupo de tanques B (véase la Figura 2).

Surgió entonces, en el equipo de investigación, la hipótesis de que el fluido gaseoso visto de alguna manera estaba relacionado con el evento. Se concluyó en primeras instancias que existía la posibilidad de formación de una mezcla volátil debida al escape de combustible.

De acuerdo con los registros meteorológicos, en las horas anteriores al incidente el clima había estado relativamente fresco, húmedo y estable, con temperaturas entre -1.7° y 1.0° Centígrado. El vapor de combustible debió estar más frío que el aire húmedo, provocando la condensación del agua durante el enfriamiento. No se reportaron vientos importantes.

Con el fin de aproximar el alcance de la mezcla volátil, los expertos examinaron la vegetación carbonizada y vehículos quemados. Fotografías aéreas y grabaciones tomadas en diferentes puntos aportaron información acerca de la extensión de la nube de combustible. Se encontraron los mayores daños debidos a las explosiones en el área entre los edificios Fuji y Northgate (véase la Figura 2), lo cual debe estar asociado a la posible localización de la explosión de mayor magnitud y las mayores intensidades de las llamas de fuego. Sin embargo, esto no necesariamente coincide con el punto donde se encendió el combustible inicialmente.

En base a la identificación de la primera aparición de neblina mediante las grabaciones, se infirió que probablemente el origen del incidente estaba localizado en el grupo de tanques de sector A (véase la Figura 2).

(b) Mecanismo de liberación de combustible.

Identificado el sector donde se había iniciado el incidente, surgía ahora la necesidad de indagar de qué manera podría haberse liberado combustible fuera del circuito primario de contención. Para ello se intensificó el examen de la evidencia electrónica disponible y el análisis forense de los restos de los componentes de los niveles de contención.

La zona más afectada dentro del depósito fue la parte oeste de HOSL, en la cual todos los tanques quedaron destruidos.

Los parapetos, en su gran mayoría, perdieron la capacidad de contención de líquido. Se observaron grietas principalmente en las juntas a causa de las presiones ejercidas por las explosiones (véase la Figura 5).

Los muros mantenían agujeros para permitir el paso de las tuberías de conducción de combustible. El material sellante usado en dichos agujeros había desaparecido por completo (véase la Figura 6). Este hecho se atribuye a las altas temperaturas ocasionadas por el combustible ardiente durante el incendio y a las presiones hidráulicas del líquido contenido. La notoria permeabilidad del concreto constituye otro punto en desventaja para los parapetos por su incapacidad de impedir las filtraciones de líquido a través de los mismos (véase la Figura 7).

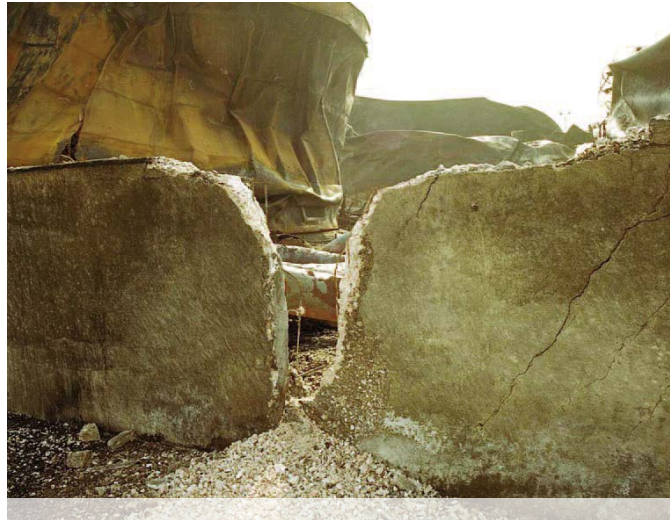


Figura 5: Fractura del muro de hormigón de un dique de contención (Buncefield Major Incident Investigation Board, 2006b).



Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

Figura 6: Agujeros en un dique de contención de hormigón para el paso de tuberías. El material sellante se había consumido (Buncefield Major Incident Investigation Board, 2006b).



Figura 7: Filtraciones de líquido a través de los diques de contención (Buncefield Major Incident Investigation Board, 2006b).

La laguna situada al noroeste del lugar (véase la Figura 2) se disponía para servir de fuente de agua útil en caso de incendios; ésta no fue utilizada ya que el agua se contaminó con el combustible y la máquina de bombeo quedó destruida por las explosiones. Por el contrario, la laguna se convirtió en un medio de escape de líquido contaminante hacia el subsuelo.

Del sistema de monitoreo electrónico de los tanques se recopilaron datos de las cantidades de combustible que se encontraban contenidas en los tanques, las válvulas que estaban en funcionamiento y el movimiento de combustible llevado a cabo horas antes del suceso. En los momentos previos al incidente la tubería FinaLine se encontraba activa, transportando combustible sin plomo desde la Refinería de Petróleo TOTAL de Lindsey hacia el tanque 915 del grupo de tanques A. El tanque 912, también ubicado en el grupo de tanques A, recibía combustible sin plomo de la tubería llamada Thames-Buncefield. El tanque 908, del grupo de tanques D, recibía diesel de la tubería Mersey-Buncefield.

A las 7:00pm del sábado 10 de diciembre (el día anterior a las explosiones) el tanque designado como 912 comenzó a ser llenado con combustible sin plomo con un caudal de 550 m³/hora. Este tanque tenía un diámetro de aproximadamente 25 m.

Ocho horas después, sin razón aparente, el sensor de nivel se detuvo en un valor fijo a pesar de que el oleoducto continuaba suministrando combustible al tanque 912. Esta última medición reportó que el volumen de líquido contenido había alcanzado dos tercios de la capacidad de dicho tanque. El medidor se mantuvo estático durante tres horas sin despertar inquietudes en la cabina de operaciones; no obstante, se trataba de una falla del sensor que no fue detectada en su momento.

El mecanismo de falla dentro del tanque 912 debió producirse cuando la presión de líquido contenido en el tanque superó la capacidad de hermeticidad del techo interno flotante. El combustible pudo empujar el elemento y fluir por los bordes hasta llenar el tanque por encima del nivel del techo flotante.

A las 5:20am, de acuerdo a las grabaciones del circuito cerrado de televisión, se empezó a desbordar combustible del tanque lleno, principalmente a través de los ocho ventiladores de sección triangular en el techo del tanque (véase la Figura 3), cada uno con un área de 0.07 m². Los medidores de nivel de tanque 912 nunca registraron que el combustible había alcanzado el nivel máximo de contención, por lo que el sistema de alarmas no dio alerta alguna de lo que estaba sucediendo. El tanque 912 se desbordó por unos 40 minutos sin ser notado por ninguna de las personas que trabajaban en el lugar.

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

El tanque 912 se volvió a llenar a un caudal de combustible de 890 m³/hora a las 5:54am debido al cierre de la válvula de otra de las tuberías que dirigía combustible desde el oleoducto principal, hacia una zona de BPA. Se especuló que para ese momento uno de los operadores había sido informado de cierta anomalía en el lugar pero cerró la válvula equivocada.

Un dato importante es que el tanque 912 estaba siendo llenado con un caudal de combustible relativamente grande de 890 m³/hora en comparación con los tanques 908 y 915, los cuales eran llenados a razón de 400 m³/hora y 220 m³/hora respectivamente. Una alta velocidad de llenado puede crear turbulencia en el líquido dentro del tanque, haciendo que aumente la energía cinética de las moléculas y, por ende, la energía total interna. El incremento de energía se traduce en un aumento de la temperatura facilitando la emanación de vapores combustibles.

Las mediciones de temperatura tomadas por los sensores indicaron que el combustible que entraba al tanque 912 tenía una temperatura mayor que el combustible que yacía en el mismo. Las lecturas indican un aumento de temperatura continuo en el interior del tanque. A través de esta información se ratificó que el tanque continuó siendo llenado hasta el momento de las explosiones.

(c) Mecanismo de inicio de fuego.

La predicción del camino seguido por el combustible una vez fuera del tanque, no fue tarea sencilla. Se recurrió a una representación física para estudiar ese aspecto y verificar la hipótesis de falla. El equipo de investigación, creó un modelo a escala completa de la octava parte de un tanque para estudiar el comportamiento del fluido una vez que escapa a la superficie (véase la Figura 8). El modelo contenía un ventilador de sección triangular en la parte superior y una placa desviadora en los bordes del techo similares al tanque original.

El líquido utilizado para correr el modelo fue agua, a sabiendas de que se comportaría algo diferente al combustible debido a las diferencias en propiedades tales como la viscosidad.

A partir de observaciones del modelo y estableciendo analogías, se concluyó que el combustible al salir por los respiraderos, se escurrió por el techo hasta colisionar con la placa desviadora en los bordes.

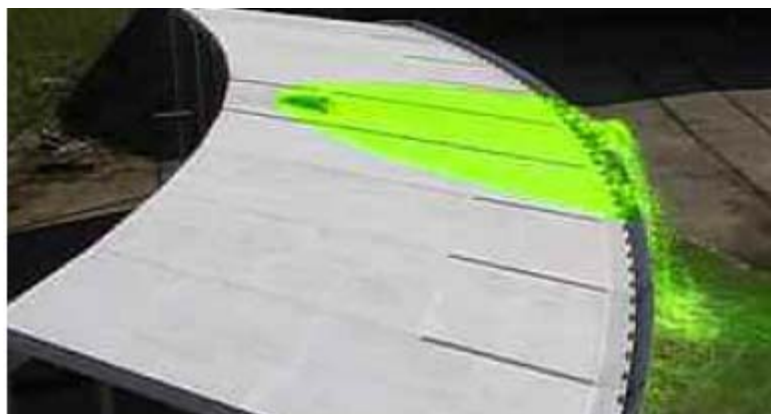


Figura 8: Modelo a escala completa de la parte superior de un tanque de almacenamiento de combustible (Buncefield Major Incident Investigation Board, 2006c).

El choque del líquido contra el suelo provocó la fragmentación del fluido y la consiguiente evaporación de los elementos más ligeros del combustible (véase la Figura 9).

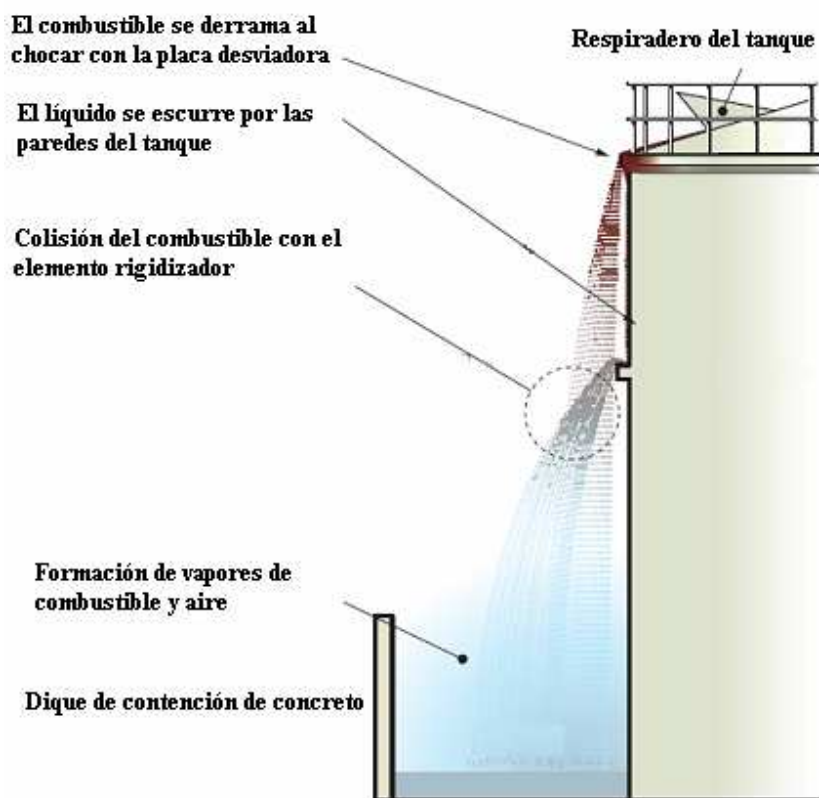


Figura 9: Mecanismo de dispersión del combustible saliendo del tanque 912.

Parte del líquido cayó como una pequeña cascada golpeando el suelo. Otra parte del líquido fluyó por las paredes del tanque hasta encontrarse con los elementos rigidizadores formando una nueva pequeña cascada y dirigiendo el líquido hacia el suelo en prácticamente caída libre. El choque del combustible con el suelo provocó de igual manera la evaporación de componentes.

Los vapores liberados en presencia de la humedad del aire crearon una mezcla que, a temperaturas de 0° centígrados, permitió la precipitación del agua en forma de neblina vista por primera vez exactamente a las 5:38 de la mañana, según las grabaciones del circuito cerrado de televisión.

Las posibles fuentes de encendido de la mezcla inflamable fueron evaluadas por los expertos las cuales pudieron incluso actuar en forma simultánea. El examen de daños permitió la identificación de explosiones internas en la caseta de bombeo y en la cabina del generador de emergencia. En la primera se asume que las bombas se activaron con las alarmas contra incendio, encendiendo de alguna manera la mezcla inflamable a su alrededor. Si esto fuese cierto, demostraría además que la localización de la caseta de bombeo era totalmente inapropiada.

La cabina del generador en caso de emergencia contenía el aparato que suministra energía eléctrica en caso de un incidente fuera de control. El cuarto poseía un equipo de calefacción a través del cual el vapor combustible pudo haber entrado. Uno de los testigos dijo que justo antes de la primera explosión se suspendió el suministro de energía eléctrica posiblemente debido a algún corto circuito. Una simple chispa eléctrica pudo hacer que el vapor inflamable comenzar a arder.

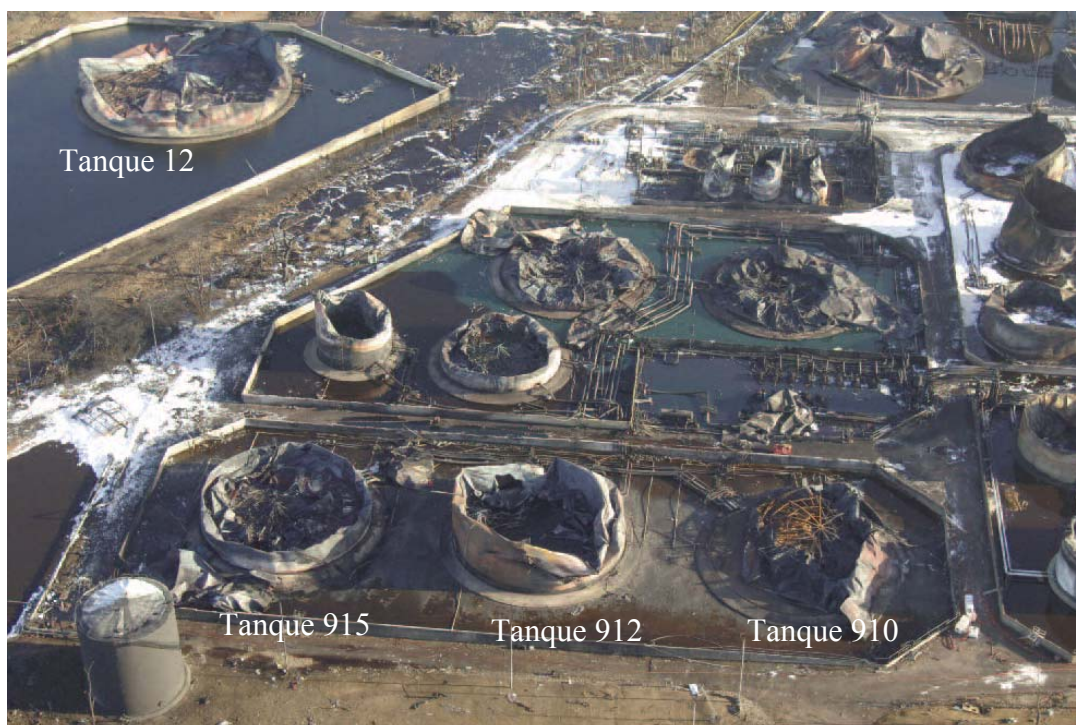


Figura 10: Destrucción causada por el incendio y las fuertes presiones debido a las explosiones (Buncefield Major Incident Investigation Board, 2006a).

Los motores de combustión interna de los vehículos fueron considerados también como candidatos que pudieron encender la mezcla inflamable.

A las 6:00am se habían desbordado unas 300 toneladas de combustible y a las 6:01am, de acuerdo a las mediciones de las vibraciones registradas por sismógrafos, aconteció la mayor explosión. El calor transmitido por las llamas proveyó la energía necesaria para mantener un continuo flujo de vapor inflamable. El incendio iniciado provocó luego menores explosiones internas en tanques afectados hasta aproximadamente las 6:28am.

A fin de estimar las magnitudes de las altas presiones ejercidas por las explosiones, el equipo de investigadores utilizó métodos actuales de predicción en base a cantidad y composición del combustible, temperatura, diferencia de presiones, fuente de ignición y el medio de propagación.

Se utilizó el método conocido como Método del TNT Equivalente, el cual consiste en hacer una analogía entre la masa de combustible que produce una explosión y la cantidad de Trinitrotolueno (TNT) necesaria para causar los mismos efectos. Luego, a partir de la masa de TNT, se determinaron los valores de presión causados durante el estallido. Una de las principales desventajas de este método radica en la diferencia real entre los efectos causados por el TNT y la nube de combustible; en el primer caso el impulso producido es de corta duración y provoca una onda de presión de gran amplitud, mientras que en el segundo caso ocurre que el impulso es relativamente más duradero pero la amplitud de onda de presión es menor.

Por otro lado se cuantificaron los daños causados por las mismas explosiones en base a la evidencia examinada. Según los cálculos, las presiones ejercidas por la onda expansiva debieron ser del orden de 2 kPa a 5 kPa en el área de la explosión, pero en la realidad se estimó que las presiones fueron hasta 20 veces mayores alcanzando los 100 kPa.

Resultó cuestionable que, en un área abierta como el área de estacionamiento entre los edificios Fuji y Northgate, las presiones cuantificadas en base a los daños severos observados en las estructuras y en el medio circundante fuesen tan altas. Las altas presiones ejercidas por las explosiones se pueden atribuir a diversas causas, como deflagración, alto contenido de butano, gran radiación térmica, turbulencia o detonación.

El hecho de que la explosión principal fuera escuchada a distancias considerables se atribuye al fenómeno conocido como Inversión Térmica. Resultados de estudios meteorológicos manifiestan que el aire y demás gases calientes se elevan formando una capa que restringe el paso de ondas acústicas haciendo que éstas sean reflejadas hacia el suelo. De este modo las ondas acústicas tienen un mayor recorrido sobre la superficie y pueden ser escuchadas a mayor distancia.

CONSECUENCIAS AMBIENTALES Y LEGALES

Después del incidente fue necesario ejecutar un programa de muestreo y monitoreo de agua con la finalidad de evaluar el impacto al ambiente y tomar medidas apropiadas para evitar consecuencias aún peores.

El Río Ver fue el punto estratégico de muestreo por la probabilidad de que sus aguas se vieran afectadas en base a la topografía y estratigrafía de la zona. Pequeñas concentraciones de Sulfonato de Perfluorooctano (PFOS) provenientes de la espuma utilizada por los bomberos fueron halladas días después del acontecimiento en concentraciones inferiores a los límites de tolerancia establecidos por la Inspección de Agua Potable (DWI). Los PFOS son compuestos contaminantes y bio-acumulativos que no se degradan en el medioambiente.

Como medida de prevención se optó por detener la sustracción de agua del acuífero posiblemente afectado por las sustancias nocivas a pesar de que no se atribuye relación directa entre las concentraciones de contaminantes encontradas en los muestreos y las emisiones del evento de Buncefield.

El líquido resultante de la mezcla de agua, espuma y derivados de petróleo acumulado en la zona del desastre fue absorbido y almacenado bajo medidas de seguridad en diversas zonas del país bajo la responsabilidad de las compañías operadoras y la supervisión de la Agencia Ambiental (EA). Se contuvieron unos 16,000 m³ de líquido a pesar de que se usaron 786 m³ de espuma y 68,000 m³ de agua en total para apagar el fuego.

En exámenes realizados a muestras tomadas en perforaciones del terreno se determinó que la capa superficial de suelo de unos 0.30 m de espesor estaba contaminada en el área del depósito. Las lluvias futuras también presentaron el riesgo de producir nuevas sustancias contaminantes al mezclarse con sustancias remanentes como hidrocarburos y PFOS.

Las corrientes de aire igualmente fueron monitoreadas de manera continua ejecutando muestreos para determinar el grado de contaminación provocado por el humo generado en el incidente. La zona de monitoreo abarcó el sur de Inglaterra y el norte de Francia. Debido a las condiciones climáticas de aquel invierno, las partículas de menor tamaño se elevaron y esparcieron rápidamente sin provocar importantes precipitaciones posteriores de sustancias nocivas. Estudios posteriores acerca del flujo de la nube de humo explican la gran probabilidad de que ésta no llegara a la superficie terrestre en ningún instante, sino que se terminó infiltrándose y esparciéndose en la parte superior de la troposfera.

Desde el punto de vista ambiental, las consecuencias no fueron tan severas, pero pudieron haberse evitado. Los reportes gubernamentales enfatizaron la poca severidad del impacto a la salud pública de los contaminantes liberados en el Incidente de Buncefield. Finalmente la Agencia Ambiental (EA) determinó la ausencia de riesgos significativos con la salvedad de que el monitoreo de sustancias contaminantes debía prolongarse por más tiempo.

TOTAL, como compañía operadora activa propietaria del 60% de HOSL, fue declarada negligente y sentenciada como responsable de la catástrofe en marzo de 2009. El monto de compensación a las víctimas (tanto a residentes, negocios perjudicados y otras compañías de combustible como Shell y BP) ascendió a los USD\$1,240 millones de acuerdo al veredicto dictado por el juez.

El proceso de compensación económica fue manejado a través de las compañías aseguradoras que brindaban servicios a los afectados.

LECCIONES APRENDIDAS PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE COMBUSTIBLE

El Incidente de Buncefield denotó la necesidad de incrementar los medios de seguridad en los centros de almacenamiento de combustible y reevaluar las medidas consideradas para mantener un control adecuado. El depósito se encontraba sólo un nivel por debajo del nivel máximo de seguridad; sin embargo, la catástrofe fue prominente.

(a) Un aspecto que resulta asombroso es la localización de negocios y residencias alrededor del depósito de Buncefield. Las propiedades ubicadas en las cercanías del depósito estuvieron expuestas al desastre. En el caso de Buncefield quedaron más de 20 mil personas sin empleos, familias con sus residencias destruidas o inhabilitadas y muchos bajo alteraciones psicológicas postraumáticas. Una situación similar se produjo en varias plantas y refinerías ubicadas en Chalmette (Godoy, 2007), que se encontraban en medio de un sector de residencias de familias de recursos medios a escasos. En ese caso, la inundación generada en los días siguientes al huracán Katrina en 2005 produjo serios daños a los tanques de almacenamiento que contaminaron al suelo local y a la población circundante. La conclusión que surge de estos estudios es que, independientemente del nivel de seguridad que tenga una refinería o un depósito de combustible, debe existir una planificación de asentamientos industriales versus residenciales y comerciales que evite el riesgo en caso de un incidente como el reportado en este artículo.

(b) En cuanto al circuito primario de contención, en el caso de Buncefield se logró establecer de manera concluyente que la falla del sensor de nivel de combustible en el tanque 912 produjo un efecto de cascada que culminó en el incidente. Lo que resalta este episodio es que la seguridad de cada tanque no puede estar confiada en un solo elemento, y que debe proveerse de redundancia a fin de evitar que la falla de un sensor conduzca a un evento en cadena. En particular, el incidente llama a reevaluar el mecanismo empleado en el funcionamiento del techo flotante, que en este caso fue vencido por la presión ejercida por el líquido. El incidente ocurrido en Guam en 2002 también estuvo asociado a la falla en el funcionamiento del techo flotante; en ese caso el mecanismo del techo se trabó por causa de deformaciones existentes en las paredes del tanque producidas por el paso de un huracán varios meses antes.

(c) En cuanto al nivel de contención secundario, los parapetos que eran una parte vital para la contención de combustibles en caso de accidentes, no tuvieron buen desempeño. Las fallas fueron notorias en las juntas y en los agujeros para el paso de tuberías. El material usado para construir los muros no fue lo suficientemente impermeable, permitiendo filtraciones de líquido hacia el exterior. Por otro lado, el nivel de contención secundario no impedía de ninguna manera el escape de gases.

Los dispositivos electrónicos de seguridad que se disponen en la actualidad también deben ser motivo de preocupación. En el caso de Buncefield, el sistema electrónico de alarma fue minuciosamente considerado y reevaluado, y se encontraron posteriormente fallas en el funcionamiento de otros interruptores de alarmas. El personal que se encontraba trabajando en la planta el día del incidente tampoco identificó irregularidades, probablemente confiando en los sistemas electrónicos que finalmente no fueron satisfactorios. Posiblemente sea necesaria una combinación de monitoreo electrónico que permita contar con redundancia efectiva.

(d) El sistema de drenaje no fue capaz de contener todo el líquido circulante, ni mucho menos de evitar que se saliera de los límites del depósito. Esto ilustra que es necesario reconsiderar el sistema terciario de contención.

(e) La localización de cada elemento en una planta de refinería o de almacenamiento de combustible suele hacerse por motivos que no son estrictamente de seguridad. En muchos casos la instalación tiene un tamaño determinado y crece

con posterioridad debido a cambios en las necesidades productivas. En esos casos se mantienen los elementos existentes y se agregan componentes nuevos entre ellos de acuerdo al espacio disponible. Tal procedimiento da origen a emplazamiento de componentes en lugares que no favorecen la seguridad del conjunto. En el caso de Buncefield, la colocación de la caseta de bombeo no fue adecuada sino que incluso pudo ser el origen de la ignición del combustible. Como parte del sistema de emergencia debió tener una mayor protección o mejor ubicación.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha considerado el incidente de Buncefield ocurrido en Inglaterra en 2005, con el fin de ilustrar la forma en que se plantean y validan hipótesis en un caso complejo de falla ingenieril. Como fuentes de información se tomaron en cuenta las publicaciones de la prensa británica, los reportes parciales y el reporte final del comité de investigación encargado del caso.

El proceso de postular hipótesis y confirmarlas (o rechazarlas) en base a la evidencia disponible se dificulta debido a que el proceso interno de trabajo del comité no está disponible públicamente; sin embargo, es posible reconstruir de qué manera la evidencia disponible en cada momento permite restringir las posibilidades. El caso de Buncefield resulta interesante en este aspecto debido a que la destrucción masiva asociada al fuego y a las explosiones impidió localizar fácilmente el origen del incidente. Tal identificación fue posible gracias a testigos circunstanciales que reportaron sus observaciones, y al monitoreo del circuito cerrado propio de la planta. Otros elementos fueron las fotografías aéreas tomadas en las primeras horas.

El segundo paso en la reconstrucción de los hechos fue postular una hipótesis de falla en un componente determinado que pudiese explicar la causa del evento. La evidencia necesaria para ello fue suministrada por los registros de monitoreo de las operaciones de movimiento de combustible que permitieron vislumbrar la secuencia de eventos que podrían haber ocurrido para que se escapase combustible del circuito primario de contención.

Finalmente, quedaba por descifrar de qué manera se esparció el combustible, volatilizándose en parte. Ante la carencia de evidencias, se llevaron a cabo ensayos en un modelo del tanque especialmente construido para verificar la hipótesis.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al apoyo de un subsidio de NSF-CCLI identificado como DUE-0736828: “A Computer-Based Simulated Environment to Learn on Structural Failures in Engineering” (Program Director: Sheryl Sorby). Sin embargo, los resultados y opiniones expresadas son solamente las de los autores y no necesariamente reflejan las perspectivas de la agencia financiadora. Las ilustraciones del incidente se han tomado de los reportes de avance de la comisión investigadora, los que pueden reproducirse sin fines comerciales.

REFERENCIAS

- Buncefield Major Incident Investigation Board (2006a). “The Buncefield Investigation: Progress Report 21 February 2006”, The Office of Public Sector Information, Richmond, Surrey, United Kingdom.
- Buncefield Major Incident Investigation Board (2006b). “The Buncefield Investigation: Second Progress Report 11 April 2006”, The Office of Public Sector Information, Richmond, Surrey, United Kingdom.
- Buncefield Major Incident Investigation Board (2006c). “The Buncefield Investigation: Third Progress Report 9 May 2006”, The Office of Public Sector Information, Richmond, Surrey, United Kingdom.
- Buncefield Major Incident Investigation Board (2008a). “The Buncefield Incident, 11 December 2005”, The final report of the Major Incident Investigation Board, Vol. 1, The Office of Public Sector Information, Richmond, Surrey, United Kingdom.
- Buncefield Major Incident Investigation Board (2008b). “The Buncefield Incident, 11 December 2005. The final report of the Major Incident Investigation Board”, Vol. 2, The Office of Public Sector Information, Richmond, Surrey, United Kingdom.
- Delatte, N. (2009). *Beyond Failure: Forensic Case Studies for Civil Engineers*, ASCE Press, Reston, Virginia.
- Godoy, L.A., Escaudar C., Jaca R.C. y Pinto F. (2001), “Revisión crítica de algunas teorías de accidentes asociadas a la infraestructura”, *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, Vol. 1, No 2, pp. 127-139.

- Godoy, L.A. (2007), "Performance of storage tanks in oil facilities damaged by Hurricanes Katrina and Rita", *ASCE J. Performance of Constructed Facilities*, Vol. 21, No 6, pp. 441-449.
- Myers, P. E. (1997). *Aboveground Storage Tanks*, McGraw Hill, New York.
- Petroski, H. (1994). *Design Paradigms: Case Histories of Error and Judgment in Engineering*, Cambridge University Press.
- Sibly, P. y Walker, A.C. (1977). "Structural accidents and their causes", *Proceeding of the Institute of Civil Engineers*, Vol. 62, pp. 191-208.

APÉNDICE: ANTECEDENTES DE EXPLOSIONES EN PLANTAS PETROLÍFERAS

Algunos antecedentes relacionados con la explosión de Buncefield han sido:

Glenpool, Oklahoma, Estados Unidos

El lunes 7 de abril de 2003, a las 8:55 de la noche, explotó un tanque de combustible con unos 900 m³ de diesel. Dicho tanque pertenecía a la compañía energética Conoco-Phillips, ubicada en Glenpool, Oklahoma. El incendio involucró a tres tanques de almacenamiento de combustible líquido y se mantuvo por casi un día completo. Los daños se valoraron en más de USD \$ 2,300,000. Nadie falleció ni resultó herido debido a este incidente.

A través de las investigaciones realizadas, se determinó que la causa más probable del incidente fue la formación de una mezcla volátil en el interior del tanque. Durante los días anteriores al evento el tanque había sido parcialmente vaciado hasta alcanzar un volumen de aproximadamente 10% de su máxima capacidad. La velocidad de conducción de combustible fue considerada alta en relación a las recomendaciones dadas en los procedimientos de manejo de la planta. Debido a la disminución del volumen de combustible, el techo flotante descendió y parte de las paredes internas del tanque quedaron humedecidas. Dichas paredes, al secarse, pudieron facilitar la formación vapores de combustible dentro del recipiente. La fuente probable de ignición fue una descarga eléctrica de una línea del tendido energético cercano.

Port Kembla, Wollongong, Australia

En el puerto marítimo de Kembla, Australia un tanque de combustible estuvo envuelto en un incendio tras una gran explosión en enero de 2004. La explosión fue audible hasta unos 25 km del lugar. Los tanques en total contenían más de 4,000 m³ de etanol al momento del incidente. Uno de ellos explotó dando cabida a un incendio que se mantuvo por unas veinte horas. El techo de dicho tanque fue desprendido por la presión generada y se estropearon los equipos cercanos para casos de incendio. Solamente un trabajador resultó herido.

Texas City, Texas, Estados Unidos

El miércoles 23 de marzo de 2005, en la refinería BP ubicada en Texas City, en el estado de Texas, Estados Unidos, ocurrió una gran explosión durante el proceso de isomerización, el cual consiste en mejorar la calidad del combustible a través de destilación del producto original. Un sobrellenado rápido de combustible en uno de los elementos del sistema permitió el derrame de combustible en el exterior y la formación de una nube de combustible a nivel de la superficie del suelo, que luego se esparció en el área.

Los medidores de nivel de líquido y el sistema de alarma no funcionaron adecuadamente. Momentos después, un conductor de camiones encendió su vehículo inflamando así la mezcla de combustible y aire a la 1:20pm. La onda de choque generada por la explosión se propagó destruyendo las instalaciones del lugar y provocando incendios en las demás áreas. Unos 50 tanques de almacenamiento fueron dañados. Decenas de personas resultaron heridas y 15 trabajadores perdieron la vida a causa de la explosión.